

# 永久磁石配置を考慮した磁気式限流器の製作と磁界数値解析による動作解析

北澤瑞喜 山田外史 池畑芳雄

環日本海域環境研究センター生体機能計測研究部門

## Magnetic Fault Current Limiter with a Noble Magnet Arrangement and Its Operating Analysis

M.Kitazawa S.Yamada Y.Ikehara

### 1. はじめに

電力需要の押し上げ要因には根強いものがあり、今後も拡大傾向が予想される。また、高度情報化に伴い、情報機器の常時運用も常態化している。加えて、近年太陽光発電に代表される分散型電源が積極的に導入されるなど電源の多様化が進行しており、電力系統が複雑化しますます難しい系統運用に迫られている。この様な中にあり、電力系統の安定運用は、現用系統の保全を含め、今後も現状以上の堅持が求められており、これに応える方策の一つとして、事故発生時に故障電流を瞬時に抑制し系統を保護する目的で、故障電流抑制用限流器（FCL：Fault Current Limiter）の開発・研究が行われている<sup>1)</sup>。

その一手法として、低圧配電系統向けに永久磁石を磁心に挿入した複合型磁心と巻線で構成される完全受動型の磁気式限流器が検討されている<sup>2)</sup>。これまで限流特性の向上のために磁心やうず電流損失が大きいたことが報告されている<sup>3)</sup>。本稿では永久磁石配置の変更による限流性能の改善について検討したので報告する。

### 2. 磁気式限流器の動作原理と直流偏磁点

電源電圧100 V、線路電流10 Aで限流を開始する低圧配電系統向けの2 kVA級の完全受動形磁気式限流器を目指している。限流器は、図1に示すように系統内に直列に挿入し、図2に示す限流性能を実現する。すなわち、通常時には電圧降下はできるだけ小さく、系統内で短絡故障時( $I_{fcl} > I_{Line}$ )には大きな負荷となり、故障電流を瞬時に抑制する。磁気式限流器の構成は、図3に示す磁心中央脚に永久磁石を挿入し、左右脚に飽和特性を示す磁心に巻線を巻いた構造である。十分に限流作用を得るには、永久磁石により両脚磁心の磁束密度を十分に飽和領域まで高くする必要がある。また、永久磁石内に流れるうず電流の影響を小さくするために中央脚上部の磁束密度を大きくし中央脚への交流磁束の流入を抑制する必要がある。

この複合型磁心の動作点図4のように永久磁石の磁気特性（線形近似：実線）と磁心の全体的な磁気特性（折れ線近似：破線）の交点となるが、磁気式限流器は巻線が巻かれている左右脚で動作するので、限流器の動作点は図4で示される左右脚の磁気特性（折れ線近似：点線）上のP点（直流偏磁点）となる。然るに、装置はこの直流偏磁点Pを中心に動作することから、P点が磁

気式限流器の設計に強く影響する<sup>3)</sup>。また、図4中の $\Delta\phi$ は限流器として利用可能な磁束の振れ幅を示し、最大限流器電圧 $V_{fclm}$ との間で次式が得られる。

$$V_{fclm} = N\omega\Delta\phi \quad (1)$$

$N$ は巻数、 $\omega$ は角周波数である。また、 $\Delta U$ は限流器として動作し始める起磁力の振れ幅を示し、限流器を含む回路の回路電流 $I_{linek}$ との間で次式が成り立つ。

$$NI_{linek} = \Delta U \quad (2)$$

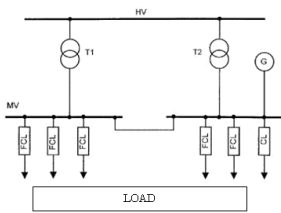


図1 限流器挿入例

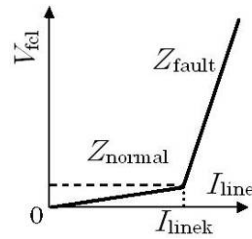


図2 実現されるべき限流器特性

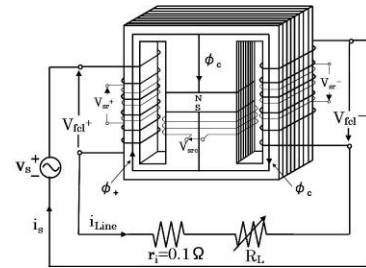


図3 限流器の構造と測定回路

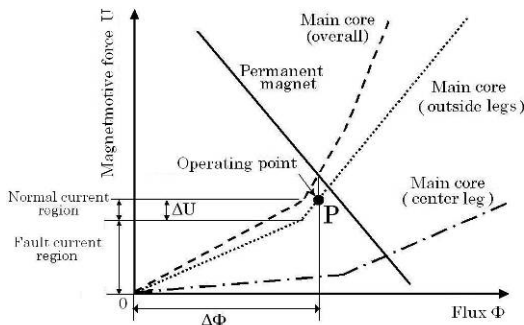


図4 直流偏磁点

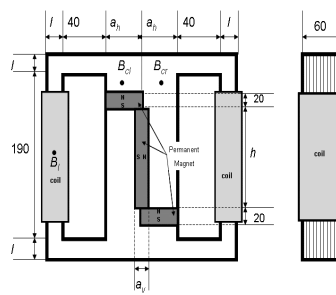


図5 磁心寸法

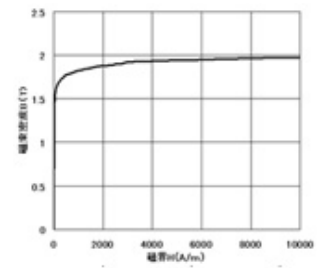


図6 磁心飽和特性

すなわち、永久磁石によって深い位置まで偏磁することにより限流性能が向上する。そこで、永久磁石の配置を変更して中央脚全体の起磁力を大きくすることを考える。図5に示すように中央脚に挿入する永久磁石をS字形に配置し、図6に示す磁心磁気特性と永久磁石で図5に示すように磁心と永久磁石の寸法 ( $a_v$ ,  $a_h$ ,  $l$ ,  $h$ ) を変化させ各部の磁束密度 ( $B_l$ ,  $B_{cr}$ ,  $B_{cl}$ ,  $B_r$ ) を有限要素法によって解析した。永久磁石の厚みを  $a=20$  mm とすると、

$$\alpha = \frac{a_h}{a} \geq 2.5, \beta = \frac{a_v}{a} \leq 1, \delta = \frac{l}{a} \leq 1.5 \quad (3)$$

となる。(3) 式の条件を満たす図7の寸法比について磁束密度分布を解析した結果を図8に示す。図8から、両脚は十分に飽和しており、中央脚上部の磁束密度も高くなっている。S字形に永久磁石を配置することにより永久磁石と鉄心の接する面積が大きくなり、より高い起磁力が生じている。

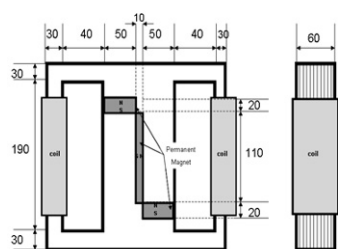


図7 製作した限流器

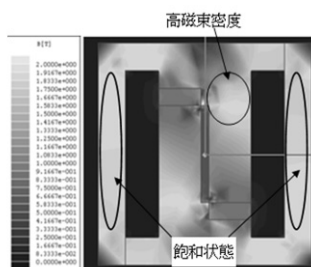


図8 磁束密度分布

### 3. 磁気式限流器の製作と特性

#### 3.1 磁気式限流器の製作

低圧配電系統向け電源電圧100 V、回路電流10 A程度で限流を開始する磁気式限流器製作した。磁心にはケイ素鋼板(協電製作所：30ZH-100)を用いて、永久磁石にはネオジム磁石を用いた。構造および寸法を図7に示し、構成図を図9に示す。巻線には各脚150回巻いた。

### 3.2 定常動作波形, 限流特性, 限流率特性

初めに, 試作した限流器が動作解析通りに動作しているかを確認する。実験は図10の測定回路において $V_s=100\text{ V}$ ,  $f=60\text{ Hz}$ として負荷抵抗 $R_L$ を変化させておこなった。通常動作時と限流動作時の各部動作波形を図11, 12に示す。通常動作時には限流器の有無にかかわらず電流の値はほとんど等しく, 限流器電圧も小さい。しかし, 限流動作時には電源電圧のほとんどが限流器電圧となっており限流器によって電圧を負担し電流を抑制している。次に, 限流器の限流性能を限流特性と(3)式により定義する限流率 $\lambda$ すなわち

$$\lambda = I_{\text{nonfcl}} / I_{\text{withfcl}} \quad (4)$$

の2つの特性で限流器を評価する。ここで,  $I_{\text{nonfcl}}$ :限流器なしの場合の回路電流,  $I_{\text{withfcl}}$ :限流器ありの場合の回路電流である。限流特性と限流率特性は図13に示す。図13の限流特性は, 図2のように十分な折れ線特性にはなっていないが, 約25 A付近から急激に大きな負荷へシフトしていることがわかる。また, 限流率 $\lambda$ は限流特性の折れ点付近から上昇し, 25 A付近で $\lambda$ が5.5 近くまで達していことから, 限流器を挿入することで電流を抑制していることが確認できる。図13の限流特性で十分な限流性能が得られていない理由は可変インダクタンス方式の限流器であるため, 限流開始電流を超えても急に限流器電圧が大きくなり, 徐々に大きくなるのでシャープな特性が現れにくいことが考えられる。

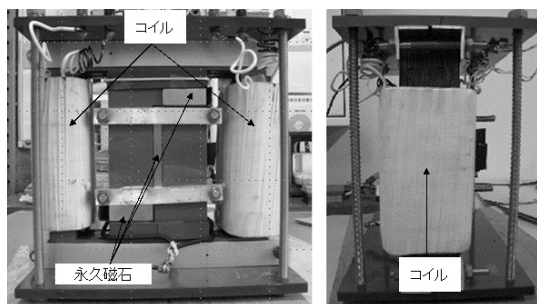


図9 磁気式限流器構成図

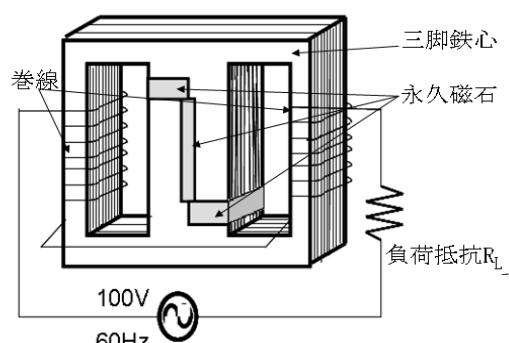


図10 磁気式限流器実験回路

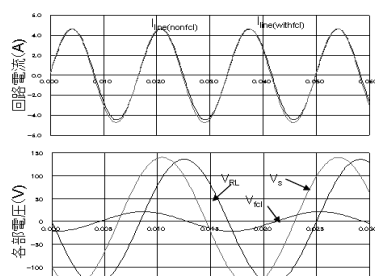


図11 通常動作時の各部時間波形

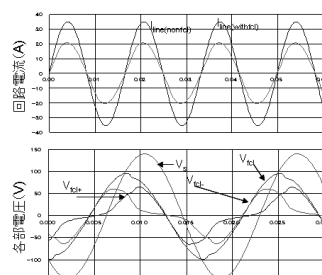


図12 限流動作時各部動作波形

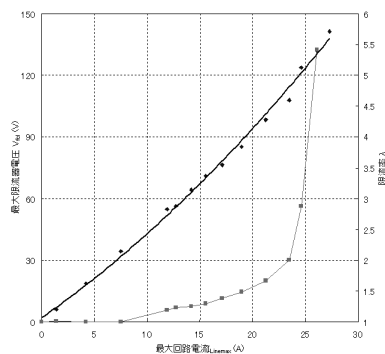


図13 限流器, 限流率特性

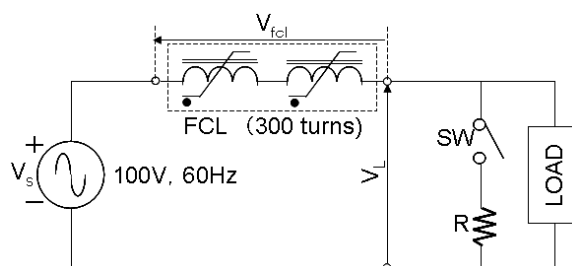
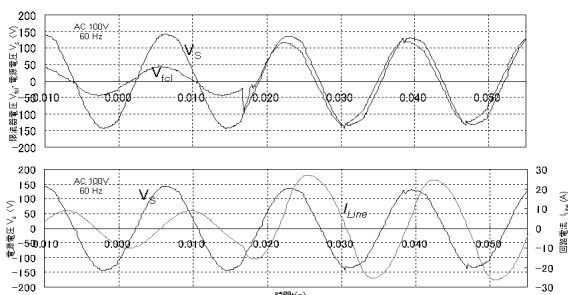
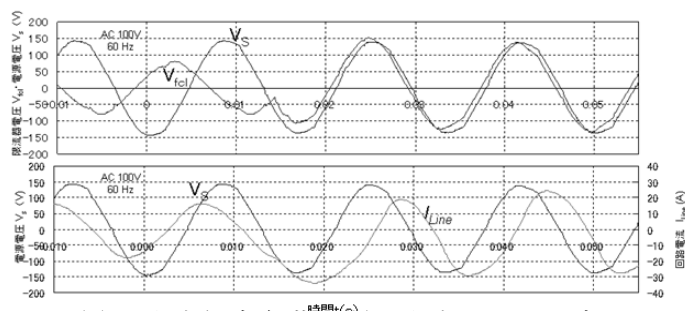


図14 検討実験回路

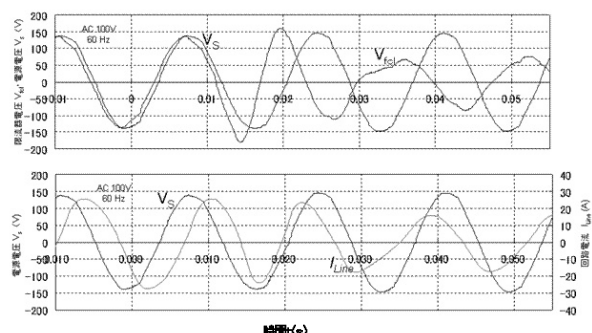


(a) 力率総合負荷を進み力率 0.2 に設定

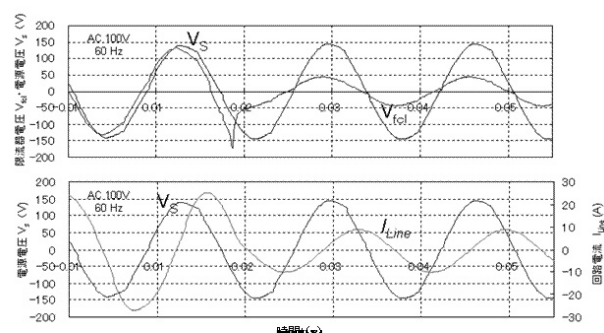


(b) 力率総合負荷を遅れ力率 0.2 に設定

図 15 限流器電圧・回路電流瞬時応答波形 (通常動作から限流動作)



(a) 力率総合負荷を進み力率 0.2 に設定



(b) 力率総合負荷を遅れ力率 0.2 に設定

図 16 限流器電圧・回路電流瞬時応答波形 (事故発生時：スイッチ開放)

## 4. 磁気式限流器の瞬時負荷特性

### 4.1 磁気式限流器の瞬時動作波形

磁気式限流器の重要な限流性能の一つとして事故が発生し事故電流が流れたときに瞬時に応答し、限流器電圧が大きくなり電流が安全電流にまで抑制し故障回復後は速やかに通常状態に戻らなくてはならない。磁気式限流器の過渡応答特性を検討するためにモーターなどのあらゆる負荷を想定して力率総合負荷を挿入した図14の実験回路を用いた。

力率を変化させたときの瞬時応答波形を力率の値を進み・遅れ共に0.2のときの事故発生・回復後の瞬時動作波形を図15, 16に示す。位相が変化しても事故発生・回復に対して限流器電圧は数ms以内にほとんどを負担し、回路電流を抑制している。しかし、スイッチが投入時の負荷の力率と電源電圧の位相の変化によって過渡状態から定常状態へ移行するまでに要する時間に負荷の種類によって時定数が変化するため瞬時に定常状態に戻らない。

### 4.2 磁気式限流器の過渡電圧・電流位相特性

事故発生・回復時(スイッチ投入・開放時)、過渡動作から定常動作へ移行するために要する時間についてスイッチ投入時の電源電圧の位相と定常状態までに要する時間について検討した。代表的な力率として進み・遅れともに力率0.2 に設定したときの結果を図17に示す。事故発生・回復後ともに進み・遅れ力率ともに定常状態までに長くとも電源電圧の2周期程度で通常状態に復帰できる。

事故発生, 事故回復時(スイッチ投入, 開放時)の電源電圧の位相が $90^\circ$  のときの力率総合負荷の位相による定常状態までに要する時間の位相特性について図18に示す。まず図18(a)から限流器が通常動作から限流動作へ移行するとき負荷の位相変化によって最大でも約20 msであり、電源電圧の1周期程度で限流動作へ移行できる。また図18(b)を見ると通常動作へ移行するときは誘導性負荷, 容量性負荷に

よって大きく定常状態になるまでの時間に違いがあるが、スイッチが投入されときの電源電圧の位相がどの値であっても定常状態になるまでに最大でも36 ms程度であることから電源電圧の二周期程度で通常動作へ復帰できる。

磁気式限流器はどのような負荷であっても事故が発生し事故電流が流れると電源電圧の70 %程度を素早く負担し回路電流を約30 A程度まで抑制し、1周期程度で定常状態になり、事故復旧後は最大でも電源電圧の2周期程度で通常状態へ移行できる。

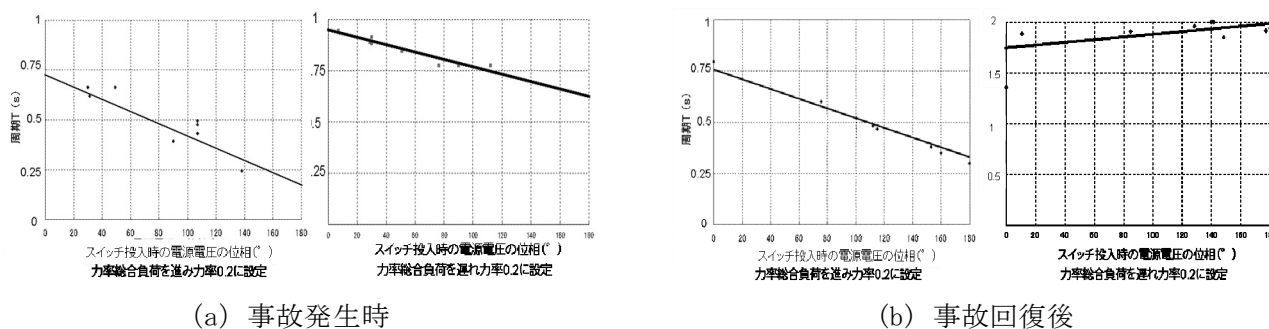


図17 過渡応答時間電源電圧位相特性

## 5. まとめ

磁気式限流器の限流性能の向上を目指し、永久磁石配置を変更し起磁力の増強について有限要素法を用いて検討した。その結果、既存の永久磁石を用いて装置外形を変化させずに起磁力増強のために適した永久磁石配置が明らかとなり、最適な寸法条件を導出できた。

その最適な寸法条件を考慮した磁気式限流器を製作し、定常・過渡状態について検討した。その結果、通常動作時は限流器電圧は小さく、回路電流はほとんど抑制されないが、限流動作時は電源電圧のほとんどを瞬時に負担し、大きな故障電流を約30A付近まで抑制できることが分かった。

限流器特性・限流率特性から約25 A付近から限流動作を開始し負荷が限流器の負荷が大きくなった。磁気式限流限流率特性から約25A付近から限流動作を開始し負荷が限流器の負荷が大きくなった。また、磁気式限流器の過渡応答動作について検討したところ、誘導性・容量性負荷などの位相を変化させるようなあらゆる負荷が挿入されても、事故発生時には瞬時に限流器電圧が大きくなり、回路電流を抑制し、最大でも電源電圧の2周期以内に過渡状態から定常状態へ自動的に復帰できることが明らかとなった。

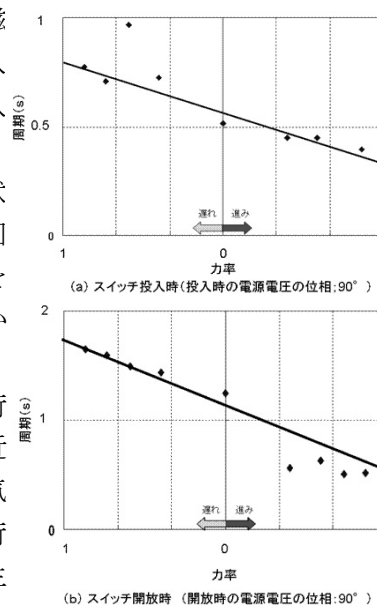


図 18 過渡応答時間負荷位相特性

## 文 献

- 1) H. Shimizu: Current State and Trends of Fault Current Limiting Technology, *IEEJ Trans. Power and Energy*, No.125 (2005)
- 2) H. Nakamichi, K. Yotsutsuji, S. Yamada, M. Iwahara: Numerical Analysis of the Core Dimensions of a Magnetic Fault Current Limiter Assuming a Practical Design and Trial Production, *Journal of MSJ*, Vol.30, No.2, pp. 282-285(2006)
- 3) K. Yotsutsuji, M. Kitazawa, S. Yamada, M. Iwahara: “Loss Consideration of Magnetic Fault Current Limiter”, Asia-Pacific Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics 2008(APSAEM2008), (2008)